

VIENNA Rectifier – Grundfunktion und Vergleich hochfrequent getakteter ein- und zweistufiger Dreiphasen-Pulsleichrichter-systeme mit sinusförmiger Stromaufnahme

U. Drofenik ÖVE, IEEE, J. W. Kolar ÖVE, IEEE¹

In der vorliegenden Arbeit wird der „VIENNA Rectifier 1“, ein 1994 an der TU Wien entwickeltes neues dreiphasiges Pulsleichrichtersystem vorgestellt. Die Schaltung weist gegenüber alternativen Gleichrichterkonzepten signifikante Vorteile, wie z. B. sinusförmigen Verlauf der Eingangsströme, asymmetrisch belastbare, geregelte Ausgangsteilspannungen, hohen Wirkungsgrad (>97%), hohe Leistungsdichte bzw. geringes Gesamtvolumen, geringe Herstellungskosten, erhöhte Betriebssicherheit und geringe Funkstörmission auf. Das System wird in Europa und den USA bereits mehrfach industriell genutzt und international an Universitäten, z. B. auch in Kanada, Japan, China und Australien, intensiv untersucht. Im zweiten Teil der Arbeit wird der VIENNA Rectifier 1 mit nachgeschalteter DC/DC-Stufe zur hochfrequenten Potentialtrennung mit zwei Weiterentwicklungen, VIENNA Rectifier 2 und VIENNA Rectifier 3, für die Realisierung des Eingangsteils einer unterbrechungsfreien Stromversorgung hinsichtlich Wirkungsgrad, Realisierungskosten und Bauvolumen verglichen.

Schlüsselwörter: Dreiphasen-Pulsleichrichter; hochfrequente Potentialtrennung; Leistungsfaktorkorrektur; Ausgangsspannungsregelung; VIENNA Rectifier

VIENNA Rectifier – basic function and comparison of high-frequency single- and double-stage three-phase PWM rectifiers with sinusoidal input current shape. In this paper a three-phase PFC PWM rectifier system with low effects on the mains (VIENNA Rectifier 1) which has been developed at the Technical University Vienna in 1994 is described. As compared to conventional rectifier systems the VIENNA Rectifier 1 shows significant advantages such as unity power factor, sinusoidal input current shape (fundamental ohmic mains behavior), controlled output voltage, high efficiency (typically 97%), low costs, high power density and/or low volume, high reliability, and significantly reduced conducted common-mode noise emission. Research is done on this system in companies and universities, e.g. in Europe, U.S.A., Canada, Japan, China and Australia. Furthermore, the paper presents a comparison of a two-stage converter system, which is formed by connecting the VIENNA Rectifier 1 to a DC/DC converter with high frequency isolation (e.g. for applications in uninterruptible power supply systems) and two further developments of the Technical University Vienna which feature single-stage power conversion, i.e. VIENNA Rectifier 2 and VIENNA Rectifier 3.

Keywords: Three-phase PWM rectifier; high-frequency isolation; unity power factor; controlled output voltage; VIENNA rectifier

1. Einleitung

¹ Dipl.-Ing. Dr. techn. Uwe Drofenik, Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johann W. Kolar, Technische Universität Wien, Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen, Gußhausstraße 27–29/E372, A-1040 Wien.

Weltweit wird an einer Homogenisierung der nationalen Empfehlungen und Vorschriften zum Thema Netzrückwirkungen gearbeitet. Für Herstellung und Ver-

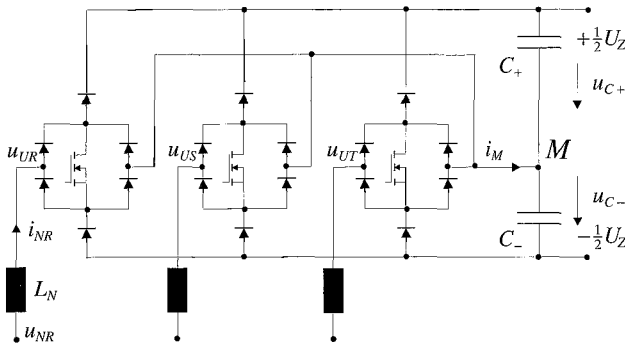


Abb. 1. Leistungskreis des VIENNA Rectifier 1

trieb einer Vielzahl von Produkten, die Gleichrichtersysteme beinhalten, wie z. B. Antriebe, Klimaanlage, prozesstechnische Stromversorgungen (elektronische Schweißstromquellen und Hochleistungslaser usw.), Batterieladung usw. wird daher die Beachtung der einschlägigen Vorschriften zukünftig von entscheidender Bedeutung sein. Wenn die Gleichrichter hohe Stromüberschwingungen verursachen, müssen beim Verbraucher Zuleitungen und unter Umständen vorhandene Generatoren entsprechend überdimensioniert werden (z. B. unterbrechungsfreie Stromversorgung in Krankenhäusern, Inselnetze in Schiffen oder Flugzeugen usw.) bzw. können Resonanzen des Netzes angeregt werden [1]. Um die teure und voluminöse Überdimensionierung anderer Systemkomponenten zu vermeiden, ist es im Interesse des Verbrauchers, netzrückwirkungsarme Gleichrichtersysteme einzusetzen.

Eine geeignete Lösung stellen moderne Pulsleichrichtersysteme dar, die den Netzstrom sinusförmig in Phase mit der Netzspannung führen und die Ausgangsspannung regeln. Die bekannteste derartige Schaltung ist der dreiphasige Sechschalter-Pulsleichrichter [2], bei dem antiparallel zu jeder Diode einer dreiphasigen Diodenbrücke ein Leistungstransistor angeordnet wird.

1994 wurde an der TU Wien ein neues Dreiphasen-Pulsleichrichtersystem entwickelt und unter der Bezeichnung VIENNA Rectifier in die internationale Fachliteratur eingeführt [3]. Gegenüber dem Sechschalter-Konverter weist der VIENNA Rectifier eine Vielzahl von Vorteilen auf (Baugröße um einen Faktor 2 reduziert, kostengünstiger, höherer Wirkungsgrad (typisch $> 97\%$), erhöhte Betriebssicherheit). Das System wird derzeit von Firmen und Universitäten in Europa (z. B. Deutschland, Schweiz, Italien, Norwegen), USA, Australien, Japan und China gebaut bzw. angeboten und dürfte sich zu einer neuen Standardschaltung für unidirektionale Dreiphasengleichrichtung entwickeln.

2. VIENNA Rectifier 1 als neues Schaltungskonzept

2.1 Grundfunktion

Abb. 1 zeigt den Leistungskreis des VIENNA Rectifier 1. Es gibt pro Phase nur einen Leistungstransistor

und sechs Dioden, wobei nur hinsichtlich der mit der positiven und der mit der negativen Ausgangsspannungsschiene verbundenen (Freilauf-)Diode die Anforderung nach kurzer Rückwärtserholzeit besteht. Die vier den Leistungstransistor umgebenden Dioden können vorteilhaft durch eine Einphasen-Gleichrichterbrücke mit Netzdioden realisiert werden. Leistungstransistor und Dioden eines Brückenzeigs sind als Leistungsmodule, IXYS VUM 25 [4] und IXYS VUM 85, für eine Gleichrichter-Nennausgangsleistung von etwa 12 kW (Schaltfrequenz: 50 kHz) bzw. 20 kW erhältlich, für die Realisierung des Gesamtsystems benötigt man drei solcher Module.

Im Falle eines positiven Netzphasenstroms $i_{N,i} > 0$, $i = R, S, T$, fließt der Strom bei offenem Schalter $s_i = 0$ über die obere Freilaufdiode in die positive Spannungsschiene, bei geschlossenem Schalter $s_i = 1$ unabhängig vom Stromvorzeichen über den Schalter und zwei Dioden in den Mittelpunkt M . Somit kann man durch Öffnen und Schließen des Schalters S , die Spannung $u_{U,i}$ und somit (in Verbindung mit der Netzspannung) den Spannungsabfall an der zugeordneten Induktivität L_N vorgeben. Für den Strom in der Induktivität gilt

$$L_N \frac{di_{N,i}}{dt} = u_{N,i} - u_{U,i} \quad (1)$$

Im Falle eines negativen Netzphasenstromes $i_{N,i} < 0$ führen analoge Überlegungen für $u_{U,i}$ der Gl. (1) zu

$$u_{U,i} = \text{sign}(i_{N,i}) (1 - s_i) \frac{1}{2} U_Z \quad (2)$$

Für eine detaillierte Beschreibung der Schaltungsfunktion ist eine Raumzeigeranalyse zweckmäßig [5].

Abb. 2 zeigt den Netzstromverlauf des VIENNA Rectifier 1, wobei ein der Computersimulation folgender Parametersatz (basierend auf einer industriellen Realisierung) zugrunde liegt: $P_{\text{OUT}} = 10 \text{ kW}$, $U_Z = 800 \text{ V}$, $U_{N,\text{rms}} = 500 \text{ V}$ ($M = 1,0$), $f_p = 32 \text{ kHz}$,

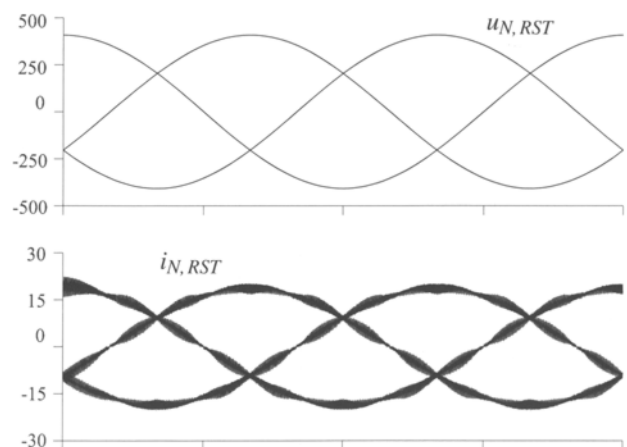


Abb. 2. Verlauf der Netzphasenspannungen und Netzphasenströme des VIENNA Rectifier 1 bei Stromregelung mittels Ramp Comparison Current Control

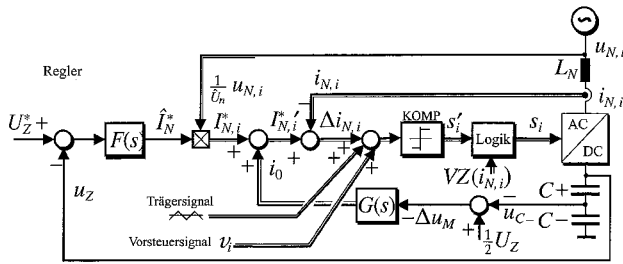


Abb. 3. Blockschaltbild der Regelung des VIENNA Rectifier 1 (Ramp Comparison Current Control)

$L_N = 300 \mu\text{H}$. Diese Parameter gehen auch für alle anderen simulierten Zeitverläufe.

Abb. 3 zeigt ein Blockschaltbild der Regelung des VIENNA Rectifier 1 [5]. Ein PI-Regler $F(s)$ generiert aus dem Spannungsregelfehler Δu_z eine Netzstromsollamplitude \hat{I}_N^* . Zum Stromregelfehler $\Delta i_{N,i}$ wird ein hochfrequentes, schaltfrequenzbestimmendes Dreieck-Trägersignal der Frequenz f_p addiert [6], das Summensignal wird einem Komparator zugeführt. Das Komparatorausgangssignal s_i' muss nun durch eine für den VIENNA Rectifier 1 typische Logik umcodiert werden, die das Signal s_i' invertiert, wenn der Netzstrom $i_{N,i}$ der Phase i negatives Vorzeichen aufweist [Gl. (2)]. Ein zweiter Unterschied zum Stromregelverfahren des Sechsschalter-Konverters ist der Mittelpunktsregler $G(s)$. Der Punkt M des VIENNA Rectifier 1 muss so geregelt werden, dass an den beiden Ausgangskondensatoren C_+ und C_- jeweils die halbe Ausgangsspannung auftritt. Eine Spannungssymmetrie am Ausgang würde zu einer Erhöhung der Sperrspannungsbelastung der Leistungshalbleiter bzw. zu deren Zerstörung führen. Eine aktive Stabilisierung in Form einer Regelung ist daher in einer praktischen Realisierung notwendig. Aus einer gemessenen Unsymmetrie $\Delta u_M = u_{C+} - u_{C-}$ wird über eine PI-Regler $G(s)$ ein Stromoffsetsignal I_0 erzeugt, das gleichermaßen zu den Stromregelfehlern $\Delta i_{N,i}$ aller drei Phasen addiert wird. Da ein dreiphasiges System keinen DC-Offset aller drei Phasen zulässt, reagiert das System mit einer Symmetrierung des Mittelpunkts, so dass $\Delta u_M = 0$ wird [3].

2.2 Vor- und Nachteile

Der VIENNA Rectifier 1 führt mit nur drei abschaltbaren Leistungshalbleitern sinusförmige Netzströme (Abb. 2). Im Gegensatz zum Sechsschalter-Konverter spart man hiemit drei teure Leistungsschalter inklusive der aufwendigen Treiberstufen.

Die Schaltung weist eine Dreipunkt-Charakteristik auf, d. h. es stehen drei Spannungsniveaus, $-\frac{1}{2}U_z$, 0 , $+\frac{1}{2}U_z$, zur Strombildung zur Verfügung. Dadurch kann bei gleicher Baugröße der Induktivitäten und gleichem Netzstromrippel die Schaltfrequenz f_p – und somit die Schaltverlustleistung – um einen Faktor $\frac{3}{2}$ gesenkt werden.

Als Sperrspannung tritt an den Leistungshalbleitern nur die halbe Ausgangsspannung $\frac{1}{2}U_z$ auf. Die näherungsweise sperrspannungsproportionalen Schaltverluste reduzieren sich daher gegenüber Gleichrichtersystemen ohne Mittelpunkt M bzw. mit Zweipunkt-Charakteristik (Sechsschalter-Konverter) um einen Faktor 2. Da der VIENNA Rectifier 1 ein Hochsetzsteller ist, beträgt die Ausgangsspannung im europäischen Netz ($U_{N_s, verkettelt} = 400 \text{ V}_{\text{rms}}$) typisch $U_z = 700 \text{ V}$ oder darüber. Die Nenn-Sperrspannung an den Schaltern beträgt somit 350 V , man kann daher schnelle und verlustarme MOSFETs anstelle von IGBTs verwenden, was eine weitere Schaltverlustreduktion um einen Faktor 2 bedeutet. Hiermit wird insgesamt eine Reduktion der Schaltverluste um einen Faktor 4 erreicht, und es ergibt sich für den VIENNA Rectifier 1 ein Wirkungsgrad von typisch 97 % (im Gegensatz zu typisch 95 % bei Sechsschalter-Konvertern). Die starke Reduktion der Verluste ermöglicht weiters den Einsatz eines stark verkleinerten Kühlkörpers [4] bzw. resultiert in einer geringen Baugröße des Gesamtsystems.

Da jeder Brückenweig nur einen Leistungstransistor aufweist, ist ein ausgangsseitiger Brückenkurzschluss verursacht durch Steuerfehler unmöglich. Man benötigt auch keine Totzeiten in den Schaltfunktionen wie etwa beim Sechsschalter-Konverter.

Wie neueste Untersuchungen gezeigt haben, kann durch eine Verbindung des Mittelpunkts mit einem eingangsseitigen künstlichen kapazitiven Netzsternpunkt und minimal erhöhtem Regelaufwand die bei Dreiphasen-Pulsleichrichtersystemen prinzipbedingt auftretende Gleichtaktverschiebung der Ausgangsspannung bzw. die resultierende Funkstörspannung (Frequenzbereich $150 \text{ kHz} \dots 30 \text{ Mhz}$) so weit reduziert werden, dass ohne weitere Filter- oder EMV-Maßnahmen die Funkstörklasse CISPR 11 (Industriebereich) erfüllt ist [11]. Dadurch ergibt sich eine weitere Reduktion von Kosten und Baugröße des Gesamtsystems.

Eine Einschränkung der Einsetzbarkeit des VIENNA Rectifier 1 stellt die Unmöglichkeit, Energie vom Ver-

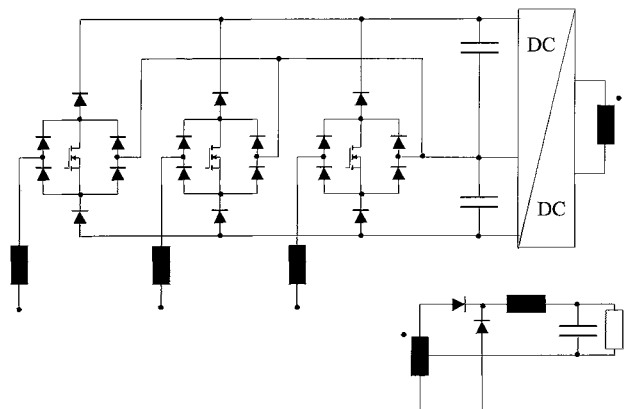


Abb. 4. VIENNA Rectifier 1 mit nachgeschaltetem DC/DC-Konverter mit hochfrequenter Potentialtrennung (zweistufiges System)

braucher ins Netz rückzuliefern (wie etwa bei Antriebssystemen mit Motoren im Bremsbetrieb erforderlich), dar. Hier muss man sich damit behelfen, die Bremsenergie entweder in einem Widerstand in Wärme umzusetzen, wodurch im Gegensatz zu bidirektionaler Ausführung des Gleichrichters Bremsbetrieb auch bei Netzausfall möglich ist.

3. VIENNA Rectifier 1 mit DC/DC-Konverter

Bei Forderung nach potentialgetrennter geregelter Ausgangsspannung (z. B. $U_{OUT} = 48\text{ V}$ bei Telekom-Stromversorgung) wird einem dreiphasigen PFC- (Power Factor Corrector-)Pulsleichrichter ein DC/DC-Konverter mit hochfrequenter Potentialtrennung (Reduktion der Transformator-Baugröße) und Feinregelung der Ausgangsspannung nachgeschaltet. Neben den im vorigen Abschnitt diskutierten Vorteilen des VIENNA Rectifier 1 als PFC-Eingangsstufe eines solchen zweistufigen Systems ergibt sich für diese Anwendung ein weiterer wichtiger Vorteil:

Wird der Mittelpunkt M des VIENNA Rectifier 1 in die Schaltungsfunktion eingebunden [7], kann sowohl aus der oberen als auch aus der unteren Ausgangsteilspannung ein DC/DC-Konverter gespeist werden, wobei beide Konverter parallel an den selben Transformator Energie liefern (Abb. 4). Jeder DC/DC-Konverter wird nur mit der halben Ausgangsspannung $\frac{1}{2} U_Z$ belastet, dadurch ergeben sich die bereits genannten Vorteile der reduzierten Schalter-Sperrspannungen auch für die nachgeschaltete DC/DC-Stufe (halbierte Schaltverluste wegen halbiertes Sperrspannung, Verwendung von verlustarmen MOSFETs statt IGBTs usw.)

4. VIENNA Rectifier 2

Der VIENNA Rectifier 2 [8] ist ein einstufiges System mit hochfrequenter Potentialtrennung und kann als Alternative zum VIENNA Rectifier 1 mit nachgeschaltetem DC/DC-Konverter betrachtet werden (Abb. 5). Beim VIENNA Rectifier 1 ist der Mittelpunktstrom i_M schaltfrequent (f_p) und weist (bei geeigneter Regelung) keine niederfrequenten Anteile auf. Als Grundidee des VIENNA Rectifier 2 wird der Mittelpunktstrom i_M über einen Transformator geführt, die hinsichtlich Lebensdauer kritischen Ausgangs-Elektrolytkondensatoren C_+ und C_- entfallen. Die detaillierte Funktion des Systems ist relativ kompliziert und kann am besten mittels Raumzeigerrechnung verstanden werden [8]. Auch die Regelung ist komplizierter als beim VIENNA Rectifier 1, es sind spezielle (niederfrequente) Vorsteuerfunktionen v_i erforderlich (Abb. 3) um bei sinusförmiger Führung des Netzstroms (Abb. 6) eine puls-frequenz-symmetrische Magnetisierung des Transformators sicherzustellen.

Vorteile des VIENNA Rectifier 2 sind insbesondere

- geringe Schaltverluste durch einfach realisierbares Soft-Switching der drei Schalter S_R, S_S, S_T ,
- relativ einfacher Leistungskreis (besonders bei Verwendung von Halbleitermodulen),
- keine großen, teuren, lebensdauerkritischen Zwischenkreis-Elektrolytkondensatoren,
- hohe Energiedichte des Gesamtsystems,
- geringe Produktionskosten.

Als Nachteile sind

- relativ aufwendige Regelung (ist sowohl analog als auch digital möglich),
- Hochlauf- und Überlastverhalten des Systems (prinzipielles Problem von Hochsetzstellern) sowie die
- Zweipunkt-Charakteristik des Eingangsteils

anzuführen.

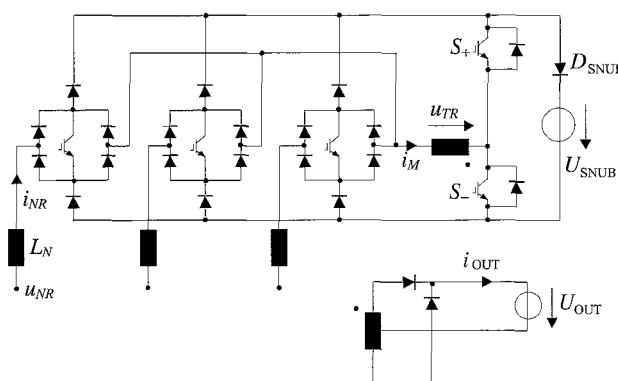


Abb. 5. VIENNA Rectifier 2 mit hochfrequenter Potentialtrennung (einstufiges System)

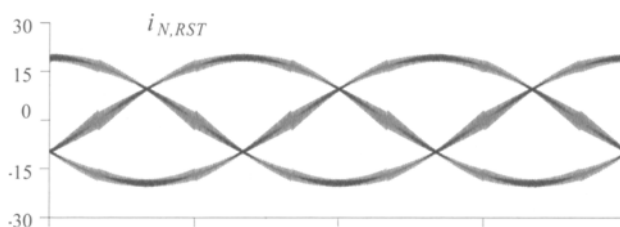


Abb. 6. Verlauf der Netzphasenströme des VIENNA Rectifier 2. Simulationsparameter: $L_N = 600\ \mu\text{H}$, $N_1/N_2 = 16,7$, $U_{OUT} = 48\text{ V}$

5. VIENNA Rectifier 3

Während der Vienna Rectifier 2 aus einer Hochsetzstellerstruktur entwickelt werden kann, stellt der VIENNA Rectifier 3 [9] ein von einer Tiefsetzstellerstruktur abgeleitetes System dar (Abb. 7). Hinsichtlich Produktionskosten und Baugröße ist der VIENNA Rectifier 3 den anderen Systemen überlegen (Kapitel 6.2), allerdings ist die Regelung nur mittels eines Signalprozessors möglich. Hauptproblem ist hierbei

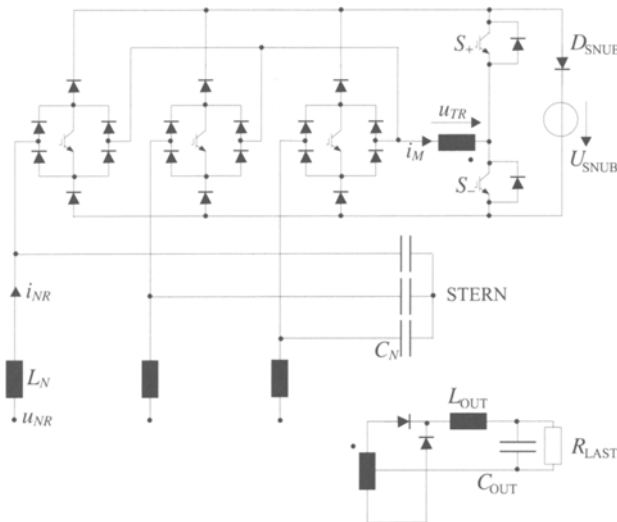


Abb. 7. VIENNA Rectifier 3 mit hochfrequenter Potentialtrennung (einstufiges System)

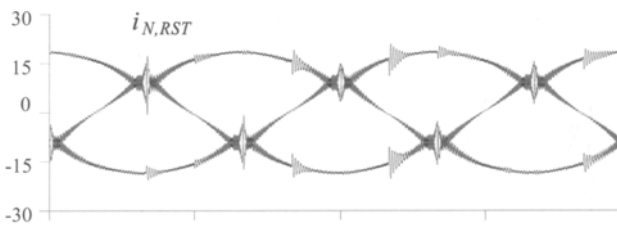


Abb. 8. Verlauf der Netzphasenströme des VIENNA Rectifier 3. Simulationsparameter: $L_N = 50 \mu\text{H}$, $C_N = 4,7 \mu\text{F}$, $N_1/N_2 = 10,3$, $U_{\text{SNUB}} = 750 \text{ V}$, $L_{\text{OUT}} = 20 \mu\text{H}$, $C_{\text{OUT}} = 4,7 \text{ mF}$, $U_{\text{OUT}} = 48 \text{ V}$

die Sicherstellung einer puls-frequent symmetrischen Transformator-Magnetisierung, die im Gegensatz zum VIENNA Rectifier 2 sehr sensitiv auf Störungen und Systemtoleranzen reagiert. Unter Berücksichtigung dieser Problematik bietet sich der VIENNA Rectifier 3 vor allem für das Gleichrichten im Bereich großer Leistung bei relativ kleinen Schaltfrequenzen ($f_p < 20 \text{ kHz}$) an. Eine detaillierte Systemanalyse wie beim VIENNA Rectifier 2 ist nur mit Raumzeigerrechnung möglich [9].

Abb. 8 zeigt eine Computersimulation der Netzströme des VIENNA Rectifier 3; der Netzstromrippel ist auf Grund des durch L_N und C_N gebildeten Eingangsfilters bereits deutlich reduziert. Die in den Zeitverläufen ersichtlichen Schwingungen ergeben sich dadurch, dass die Regelung in der Simulation ohne aktive Dämpfung des Filters ausgeführt wurde. Mittels aktiver Dämpfung können diese Schwingungen völlig eliminiert werden, wie auch die experimentelle Untersuchung eines Prototyps gezeigt hat.

Neben den bereits beim VIENNA Rectifier 2 angeführten Vorteilen findet man beim VIENNA Rectifier 3 die typischen Vorteile eines Tiefsetzstellers:

- Begrenzung eventueller Kurzschlussströme durch die ausgangsseitige Induktivität L_{OUT} ,
- einfaches Hochfahren.

Nachteile sind

- relativ aufwendige Regelung bzw. Symmetrierung der Transformator-Magnetisierung (nur mit Signalprozessor möglich)
- Schwingneigung des Eingangsfilters bzw. Begrenzung der Dynamik der Ausgangsspannungsregelung durch die Knickfrequenz des Eingangsfilters.

6. Vergleich der Schaltungen

6.1 Vergleich des VIENNA Rectifier 1 mit dem Sechsschalter-Konverter

Ein bekanntes Puls-gleichrichtersystem zur Leistungsfaktorkorrektur bzw. Strom Oberschwingungsreduktion ist der schon erwähnte Sechsschalter-Konverter. Wie der VIENNA Rectifier 1 weist dieses System sinusförmige Netzströme und geregelte Ausgangsspannung auf. Beide Schaltungen sind Hochsetzsteller. In [10] wurde unter anderem ein detaillierter Vergleich des VIENNA Rectifier 1 mit diesem System durchgeführt; Abb. 9 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse dieser Gegenüberstellung.

Die Parameter für beide Schaltungen sind dabei: $P_{\text{OUT}} = 10 \text{ kW}$, $U_Z = 700 \text{ V}$, $U_N = 230 \text{ V}_{\text{rms}}$, $f_p = 20 \text{ kHz}$, $L_N = 700 \mu\text{H}$. Der Sechsschalter-Konverter verwendet IGBTs (SKM44Gd 123D), der VIENNA Rectifier 1 MOSFETs (Modul IXYS VUM25). Die Ergebnisse in [10] basieren auf numerischen und analytischen Berechnungen [4] und Datenblattangaben. Der Verzerrungsfaktor der Eingangsströme (Total Harmonic Distortion, THD) in Abb. 9, rechts, wurde für $f_p = 40 \text{ kHz}$ und $L_N = 300 \mu\text{H}$ berechnet.

6.2 Vergleich zwischen den Systemen VIENNA Rectifier 1, und 2 und 3

Abb. 10 zeigt eine Abschätzung von Wirkungsgrad, Kosten und Bauvolumen der drei Systeme VIENNA Rectifier 1 mit DC/DC-Konverter, VIENNA Rectifier 2 und VIENNA Rectifier 3. Die zugrundeliegenden Schaltungsparameter sind den Parameterangaben der

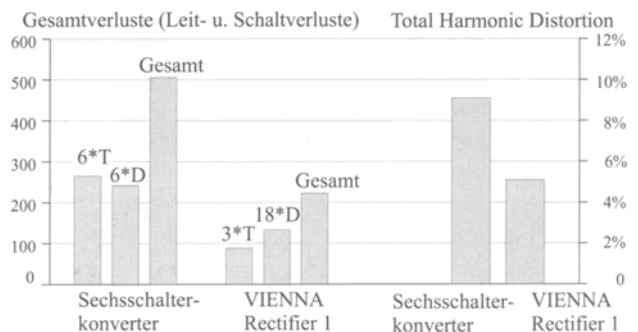


Abb. 9. Halbleiterverluste (Dioden und Transistoren) und Verzerrungsfaktor (Total Harmonic Distortion, THD) des Netzstroms von Sechsschalter-Konverter und VIENNA Rectifier 1 im Vergleich

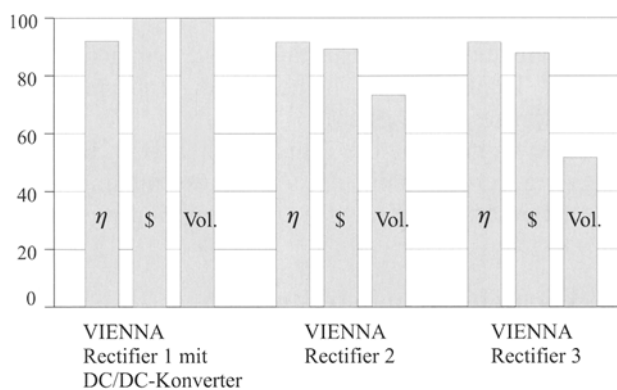


Abb. 10. Vergleich von VIENNA Rectifier 1 mit DC/DC-Konverter, VIENNA Rectifier 2 und VIENNA Rectifier 3 hinsichtlich Wirkungsgrad (η), Kosten (\$) und Bauvolumen (Vol.)

vorgehenden Abschnitte zu entnehmen. Vergleichsbasis sind gleiche Systemverluste, womit für alle drei Systeme Kühlkörper gleicher Größe einsetzbar sind. Die nicht unwesentliche Kühlkörpergröße ist in der Abb. 10 (normierte Darstellung) nicht berücksichtigt.

Der VIENNA Rectifier 3 zeigt gegenüber den anderen beiden Systemen Vorteile, wobei auch zu berücksichtigen ist, dass die eingangsseitigen Induktivitäten, die für System 1 und 2 für ein eventuelles EMV-Filter vorzusehen sind, beim VIENNA Rectifier 3 bereits (teilweise) berücksichtigt sind. Allerdings ist der VIENNA Rectifier 1 mit DC/DC-Konverter seitens der Regelung einfacher als die beiden anderen Systeme, speziell beim VIENNA Rectifier 3 ist die Regelung kompliziert und nur mittels eines Signalprozessors möglich.

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues dreiphasiges Pulsgleichrichtersystem (VIENNA Rectifier 1) mit hohem Leistungsfaktor (sinusförmiger Eingangsstromverlauf, ohmsches Grundschwingungsnetzverhalten) und geregelter Ausgangsspannung vorgestellt. Verglichen mit einer konventionellen Ausführung, dem weit verbreiteten Sechsschalter-Konverter, zeigt dieses System zahlreiche Vorteile. Hervorzuheben sind insbesondere die geringen Schaltverluste, der sehr hohe Wirkungsgrad, das geringe Bauvolumen, die niedrigen Herstellungskosten und die hohe Betriebssicherheit. In Verbindung mit einer nachgeschalteten DC/DC-Stufe mit hochfrequenter Potentialtrennung ergibt sich ein zweistufiges System, das industriell bereits in Europa und USA z. B. im Bereich der unterbrechungsfreien Stromversorgung breite Anwendung findet und sich zur Standardlösung im Bereich netzrückwirkungsarmer unidirektionaler Dreiphasengleichrichtung entwickelt.

Weiters werden als Weiterentwicklungen des VIENNA Rectifier 1 der VIENNA Rectifier 2 und VIENNA Rectifier 3 vorgestellt. Auf Grund der direkten, d. h. einstufigen Energieumformung weisen diese Systeme

reduzierte Realisierungskosten und reduziertes Bauvolumen auf, die Komplexität der Regelung ist jedoch höher als beim VIENNA Rectifier 1 mit DC/DC-Konverter. Mögliche vorteilhafte Anwendungen dieser Schaltungen liegen im Bereich hoher Leistung und relativ geringer Schaltfrequenz.

Danksagung

Die Autoren danken dem Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank für die großzügige Unterstützung der Forschungsarbeiten des Instituts für Elektrische Antriebe und Maschinen der Technischen Universität Wien.

Schrifttum

- [1] Zach, F.: Leistungselektronik: Bauelemente, Leistungskreise, Steuerungskreise, Beeinflussungen. 3., verb. u. erg. Auflage. Wien, New York: Springer. 1990.
- [2] Heumann, K., Stumpe, A. C.: Thyristoren – Eigenschaften und Anwendungen. 3. Auflage. Stuttgart: Teubner. 1974.
- [3] Kolar, J. W., Zach, F. C.: A novel three-phase three-switch three-level unity power factor PWM rectifier. PCIM '94. Nürnberg, 28. bis 30. Juni, (1994), S. 125–138.
- [4] Kolar, J. W., Ertl, H., Zach, F. C.: IXYS-VUM25-E – A new isolated power module for low-cost/weight/volume high performance three-phase sinusoidal input current power conditioning. PQ'95, Bremen, 7. bis 9. Nov., (1995), S. 461–481.
- [5] Kolar, J. W., Drofenik, U., Zach, F. C.: Space vector based analysis of the variation and control of the neutral point potential of hysteresis current controlled three-phase/switch/level PWM rectifier systems. PEDS '95, Singapur, 21. bis 24. Feb. Vol. I, (1995), S. 22–33.
- [6] Weinmann, A.: Regelungen – Analyse und technischer Entwurf. Band 2: Nichtlineare, abtastende und komplexe Systeme; modale, optimale und stochastische Verfahren. Wien, New York: Springer. 1984.
- [7] Kolar, J. W., Drofenik, U., Zach, F. C.: Current handling capability of the neutral point of a three-phase/switch/level boost-type PWM rectifier. IEEE PESC 96. Baveno, Italien, 24. bis 27. Juni. Vol. II. (1996), S. 1329–1336.
- [8] Kolar, J. W., Drofenik, U., Zach, F. C.: VIENNA Rectifier II – A novel single-stage high-frequency isolated three-phase PWM rectifier system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, Nr. 4, (1999), S. 674–691.
- [9] Kolar, J. W., Drofenik, U., Ertl, H., Zach, F. C.: VIENNA Rectifier III – A novel three-phase single-stage buck-derived unity power factor AC-to-DC converter system. IEEE NORPIE '98, Espoo, Finnland, 26. und 27. August, (1998), S. 9–18.
- [10] Ide, P., Froehleke, N., Grotstollen, H.: Comparison of selected 3-phase switched-mode rectifiers. IEEE INTELEC '97. Melbourne, Australien. S. 630–636.
- [11] Kolar, J. W., Drofenik, U., Miniböck, J., Ertl, H.: A new concept for minimizing high-frequency common-mode EMI of three-phase PWM rectifier systems by keeping high utilization of the output voltage. IEEE APEC 2000. New Orleans, USA, 6. bis 10. Feb. in Druck.